

Abstract (Basic): JP 2001074954 A

NOVELTY - A periodic laminate structure is formed by alternately laminating material of two or more kinds of refractive indices on the substrate. A 2D or 3D periodic mask pattern is formed on the periodic laminate structure by lithography. Etching pattern is formed with respect to mask pattern on the periodic laminate structure for forming vertical periodic structure.

USE - For forming three dimensional photonic crystal structure for accommodating various optical devices, optical information processing devices such as laser used for light transmitting, optical waveguide, optical integrated circuit.

ADVANTAGE - As crystallization at specific area in multilayer is performed, the method of three dimensional photonic crystal structure is made easy, comparatively.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows the production process of three dimensional photonic crystal structure.

pp; 17 DwgNo 31/57

Title Terms: THREE; DIMENSION; PHOTON; CRYSTAL; STRUCTURE; FORMATION;
METHOD; OPTICAL; IC; FORMING; ETCH; PATTERN; RELATIVE; MASK; PATTERN;
PERIODIC; LAMINATE; STRUCTURE; FORMING; VERTICAL; PERIODIC; STRUCTURE

Derwent Class: P81; V07

International Patent Class (Main): G02B-006/122

File Segment: EPI; EngPI

Manual Codes (EPI/S-X): V07-F01A5

AL4

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-74954
(P2001-74954A)

(43) 公開日 平成13年3月23日 (2001.3.23)

(51) Int.Cl.
G 0 2 B 6/122

識別記号

F I
G 0 2 B 6/12

テマコード* (参考)
A 2 H 0 4 7

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平11-246522

(22) 出願日 平成11年8月31日 (1999.8.31)

(71) 出願人 000004226
日本電信電話株式会社
東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(71) 出願人 391006566
川上 彰二郎
宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋
マンションファラオC-09

(72) 発明者 納富 雅也
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100077481
弁理士 谷 義一 (外1名)

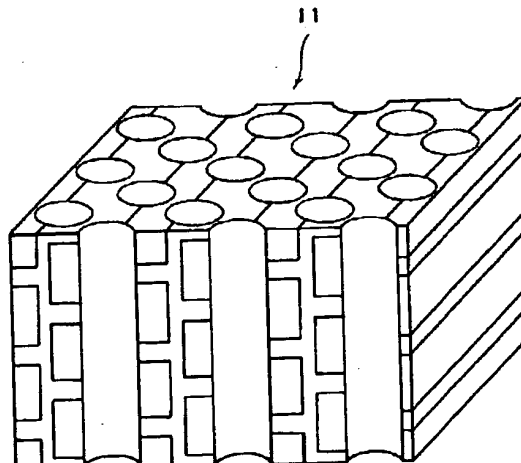
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3次元フォトニック結晶構造体の作製方法

(57) 【要約】

【課題】 3次元フルバンドギャップフォトニック結晶構造体の従来の作製方法が非常に高度な作製技術を必要とし、多層で十分な面積を持った結晶を作ることが非常に困難であった問題点を解決する。

【解決手段】 1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ2種類以上の屈折率の異なる材料を交互に積層することにより2次元または3次元周期積層構造体を形成する周期積層構造体形成工程と、前記周期積層構造体に、その周期性方向に対して垂直に、1次元または2次元の垂直周期構造を加工する垂直周期構造形成工程と、を有することを特徴とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ2種類以上の屈折率の異なる材料を交互に積層することにより2次元または3次元周期積層構造体を形成する周期積層構造体形成工程と、前記周期積層構造体に、その周期性方向に対して垂直に、1次元または2次元の垂直周期構造を加工する垂直周期構造形成工程と、を有することを特徴とする3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【請求項2】 前記垂直周期構造形成工程が、前記周期積層構造体の周期構造が周期性を示す平面にリソグラフィにより1次元または2次元のマスクパターンを形成し、このマスクパターンに従ったエッチングパターンを前記周期積層構造体に形成することにより前記垂直周期構造を得る工程であることを特徴とする請求項1に記載の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【請求項3】 前記垂直周期構造に前記交互に積層した材料の少なくとも一方の材料と屈折率の異なる材料を充填することを特徴とする請求項1または2に記載の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【請求項4】 前記周期積層構造体形成工程が、前記1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ、バイアススパッタプロセスまたはスパッタエッチングと、スパッタデポジションとを独立または同時に行う成膜プロセスにおける形状保存積層モード（自己クロニングモード）を用いて、前記2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する工程であることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【請求項5】 前記パターン基板上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する際に、各材料層の積層形状は形状非保存であるが一周期分の積層形状に関しては形状保存するような非対称形状保存モードを用いることを特徴とする請求項4に記載の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【請求項6】 前記パターン基板上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する際に、ある一つの材料を形成保存モードで積層した後に垂直性の高くないエッチングを行うプロセスを追加したことを特徴とする請求項4または5に記載の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光情報処理、光伝送等に用いられるレーザ、光導波路、光集積回路等の様々な光デバイスを構成するに好適な3次元フォトニック結晶構造体の作製方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】誘電体の3次元周期構造体の中では、光は周期的摂動を受ける。そして、その時の周波数の分散

関係は、結晶中の電子のバンド構造と同じ様なバンド構造をとることが知られている。このような誘電体周期構造体は、フォトニック結晶またはフォトニック結晶構造体と呼ばれている。フォトニック結晶中の光の伝搬はバンド構造によって決定されるため、その結晶構造や周期的摂動の大きさを制御することにより、そのフォトニック結晶構造体の光学的性質を自由に設計することが可能である。

【0003】1987年にYablonovitchにより、3次元的にバンドギャップが開いたフォトニック結晶構造体（フォトニックバンドギャップ材料）を用いて光を完全に閉じ込めることができるという指摘（E.Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059(1987)）がなされた。この指摘がきっかけとなって、前述のフォトニック結晶構造体の有用性が注目されるようになった。

【0004】しかし、3次元的に完全にバンドギャップが開くと予想されている結晶構造体は数少ない。周知のように、光の進行方向がどの方向にあらうと、フォトニックバンドギャップが開いた状態は、フルバンドギャップと呼称されている。このフルバンドギャップの存在は、1991年にHo等による理論解析により、初めて、ダイヤモンド構造にあることが予言された。しかし、現在に至っても、3次元的に完全にバンドギャップが開くと予想できる結晶構造は、前述のダイヤモンド構造と、このダイヤモンド構造に類似した構造に限られている。

【0005】また、光の領域で動作するフォトニック結晶構造体を実現するためには、光の波長以下の加工精度が要求されるため、作製可能な結晶構造体は限定される。光の波長以下の加工精度を持つ加工技術は、電子ビームリソグラフィやドライエッチングに代表される半導体リソグラフィ技術であるが、このような技術で作製可能でかつバンドギャップが開く結晶構造体としては、図1および図2に示す構造のものがある。

【0006】図1に示した結晶構造体について説明する。この構造体は、高屈折率材料1の上面にマスクとして形成した膜2に、リソグラフィにより、多数の穴2aを格子状に配列したパターンを形成し、これらの穴2aを介して高屈折率材料1に斜め角度から垂直性の良いドライエッチングを3回行うことにより、作製される。この結晶構造体の構造は、ダイヤモンド構造の3本の（110）軸方向（（110）、（101）、（011）方向）に、孔が貫通している構造となっている。厳密なダイヤモンド構造は、上記の3本だけでなく残りの3本の（110）軸方向（（-110）、（10-1）、（0-11）方向）にも貫通孔がなければならない。しかし、上記の構造体でも実際にバンドギャップが開くことが計算により実証されており、マイクロ波領域では実験的に検証が行われている（E.Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K.M. Leung, Phys. Rev. Lett. 67, 2295(1

991))。

【0007】また、図2に模式的に示した結晶構造体の構造は、一定間隔で並んだロッド3を位相を半周期だけずらしながら、90度回転して順次重ねていくことにより、形成される構造である。ここでのロッド3は、(110)と(-110)方向に向いており、積層方向は(001)方向である。各層のロッド3が隣の層のロッド3と互いに半周期ずつずれて重なっているために、その積層部分におけるロッド同士の接点が、残りの(110)軸方向((101), (10-1), (011), (0-11))へのチャネルを形作り、全体としてダイヤモンド構造と同じ対称性を生じ、その結果、フルバンドギャップを持つ。このことは、理論的に示されている。既に、図2に模式的に示した構造体について、マイクロマシン技術を応用することにより、波長12 μ m程度のもので作製されている(S-Y.Lin et al., Nature 394, 251(1998))。

【0008】図3および図4に模式的に示す結晶構造体は、3次元正方グリッド格子および3次元六角グリッド格子である。これらの構造体は、ダイヤモンド構造体とは異なるが、フルバンドギャップを持つことが報告されている。しかし、これらの結晶構造体を実際に作製することは困難であり、理論的な検討があったのみで、これまでに実際に作製を試みた報告は無い。

【0009】以上のように、フルバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶構造体およびその作製方法として幾つかのものが提案されている。しかしながら、いずれの方法によっても、ある程度以上の層数を持つ結晶構造体を作製することは極めて困難である。また、いずれの方法によっても、現在までに実際に作製されているフォトニック結晶構造体はギャップが赤外領域またはマイクロ波領域に位置するものであり、近赤外、可視光の領域で完全にバンドギャップの開いた3次元フォトニック結晶構造体は実現していない。

【0010】これらと異なるフォトニック結晶構造体の作製方法としては、図5、6に示すような2次元の周期構造をその上面に有する基板4を作製し、図7、8に示すように、基板4上に誘電率の異なる層5、6を交互に積層することにより、3次元周期構造体7を作製する、という方法が知られている。この方法自体は、Yablonovitchが1987年の前述の論文で指摘していた。しかしながら、通常の積層条件を用いると、表面の平坦化が速やかに起こり、そのために、実際に作製される構造は、図9、10のように、上層になるにしたがって2次元周期構造が消失してしまい、結果的に3次元周期構造体を構成しない。

【0011】これに対して、その後、バイアススパッタの特定のモードを用いることにより、基板の凹凸を保存する形状保存モード(自己クロウニングモード)が実現可能となり、これを用いた3次元周期構造体の作製が報

告されている(S.Kawakami, Electronics Letters 33, 126, 1997)。図11に示すような複数の六角穴がパターン化された基板8上に、前述の形状保存モードにより、交互多層膜9を積層すると、図12に示すように、図11に示した基板8上に2次元周期構造を忠実に保存した形状の多層膜9が形成される。この方法による3次元周期構造の形成プロセスを具体的に説明する。まず、図13、14、15に示すように、2次元周期穴構造8aをリソグラフィおよびドライエッチング加工により形成し、この2次元周期穴構造8aの上にSi/SiO₂の交互積層多層膜9を自己クロウニングモードにより積層することによって、図12に示した3次元周期構造体10が作製される。40層以上の積層においても表面平坦化が起こらず、形状保存が保たれていることが既に確認されている。この方法は、先にあげた図1、2、3および4を用いて説明した方法に比べて遙かに作製プロセスが単純であり、大きな膜厚の3次元フォトニック結晶構造体を比較的容易に作製することができる、という特徴がある。

【0012】しかしながら、一般に2次元周期構造上に交互積層を行って作製される図7、8や図12に示したタイプの3次元周期構造体7や10では、3次元フルバンドギャップが生じることが理論的に確認されているダイヤモンド構造(非対称面心立方構造)を実現することができない。すなわち、図7、8や図12に示したような交互積層による作製方法では、従来、フルバンドギャップを実現することは難しいと考えられていた。

【0013】また、これとは異なる方法として、2次元フォトニック結晶構造体に後から垂直ドライエッチングにより周期的な穴を開けることにより、フルバンドギャップが開くことが知られている(図2の構造と等価な)3次元結晶構造体を作製することが可能であるが、S.Fan等により報告されている(S.Fan et al. Applied Physics Letters 65, (1994) 1466)。この構造体の模式図を、図16に示す。この構造体11は、次のようにして作製される。すなわち、図19に示すように、基板12上にSi層13を形成した後、このSi層13にエッチングにより穴14を形成する。この穴14を、図20に示すように、SiO₂15により埋める。次に、図21に示すように、さらにSi層16を積層し、さらに、図22に示すように、Si層16にエッチングにより穴17を形成する。この穴17は前記Si層13内にまで到達するように形成される。続いて、図23に示すように、穴17をSiO₂15で埋める。同様に、図24～図26に示すように、Si層18を積層し、このSi層18を貫通し、下のSi層16にまで到達する穴19を形成し、この穴19をSiO₂15で埋める。これら一連の工程を繰り返すことにより、図17に示すように3次元周期構造体20を形成する。この3次元周期構造体20に対して、図18に示すように、垂直穴21を

穿設することにより、図16に示すような3次元結晶構造体11が得られる。

【0014】このような作製プロセスでは、はじめの2次元フォトニック結晶20を作製するために各層ごとに位置合わせおよびリソグラフィを含む再加工程が必要であり、そのため、この作製工程は、先に述べた交互積層による作製方法に比べて、極めて複雑であり、実行は困難と思われる。それを裏付けるように、現在までに、図16に示す構造の3次元フォトニック結晶構造体の作製を試みた例は報告されていない。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】本発明では、3次元フルバンドギャップフォトニック結晶構造体の従来の作製方法が非常に高度な作製技術を必要とし、多層で十分な面積を持った結晶を作ることが非常に困難であった問題を解決することを、課題とする。すなわち、本発明の課題では、自己クローニングによる形状保存多層化が容易であるパターン形成基板上への交互積層を行う方法を用いて、フルバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶構造体を得ることのできる3次元フォトニック結晶構造体の作製方法を提供することにある。

【0016】

【課題を解決するための手段】フルバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶構造体を作製する従来技術は、先に、図1、図2、図3および4を用いて説明したように、複雑な工程を用いており、多層化が容易ではなかった。一方、図7、8および9を用いて説明したように、周期的なパターンを形成した基板上へ、自己クローニング現象を用いた交互積層によって、3次元フォトニック結晶構造体を作製する方法は、前述したように、比較的単純な工程を用いており、かつ多層化大面積化は容易であるが、フルバンドギャップを有する構造を作製することは困難であった。

【0017】本発明では、1次元または2次元の周期的なパターンを形成した基板上へ交互積層により作製された周期積層構造体に、さらに、リソグラフィによって1次元または2次元周期パターンの簡単な加工を加えることにより、フルバンドギャップを有する結晶構造体に改造して、フルバンドギャップ3次元フォトニック結晶構造体を得ることを特徴とする。

【0018】図16を用いて説明したように、複雑な工程によって作製される2次元周期積層構造体に垂直穴加工を施すことにより、3次元フォトニック結晶構造体を作製する手法は、既に報告されている。

【0019】しかし、この公知の方法に対して、本発明の方法では、垂直穴加工を行う前の2次元または3次元周期積層構造体を作製する方法において、パターン基板上への交互積層を用いる点が大きく異なる。本発明方法では、この自己クローニング現象を利用した交互積層方法を用いるために、作製プロセスが飛躍的に単純化され

る。一方、図16に示した構造そのものは、パターン基板上の交互積層方法によっては作製することが原理的に不可能である。したがって、本発明では、交互積層によって作製可能で、かつ後の垂直穴加工により3次元フルバンドギャップ化が可能な新たな構造体およびその作製方法を提供する。

【0020】また、実施例において詳しく説明する変調自己クローニング積層法と、in-situでのエッチングによる穿孔法とを組み合わせることで、同方法で作製される3次元フォトニック結晶構造体のバンドギャップのさらなる拡大を実現する。

【0021】すなわち、本発明の3次元フォトニック結晶構造体の作製方法は、1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ2種類以上の屈折率の異なる材料を交互に積層することにより2次元または3次元周期積層構造体を形成する周期積層構造体形成工程と、前記周期積層構造体に、その周期性方向に対して垂直に、1次元または2次元の垂直周期構造を加工する垂直周期構造形成工程と、を有することを特徴とする。

【0022】

【発明の実施の形態】前述のように、本発明にかかる3次元フォトニック結晶構造体の作製方法の特徴は、1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ2種類以上の屈折率の異なる材料を交互に積層することにより2次元または3次元周期積層構造体を形成する周期積層構造体形成工程と、前記周期積層構造体に、その周期性方向に対して垂直に、1次元または2次元の垂直周期構造を加工する垂直周期構造形成工程と、を有することにある。

【0023】前記構成において、本発明では、前記垂直周期構造形成工程が、前記周期積層構造体の周期構造が周期性を示す平面にリソグラフィにより1次元または2次元のマスクパターンを形成し、このマスクパターンに従ったエッチングパターンを前記周期積層構造体に形成することにより前記垂直周期構造を得る工程であってもよい。

【0024】ここで、前記垂直周期構造に、前記交互に積層した材料の少なくとも一方の材料と屈折率の異なる材料を充填してもよい。

【0025】また、前記周期積層構造体形成工程が、前記1次元または2次元の周期パターンを形成した基板上へ、バイアススパッタプロセスまたはスパッタエッチングと、スパッタデポジションとを独立または同時に行う成膜プロセスにおける形状保存積層モード（自己クローニングモード）を用いて、前記2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する工程であってもよい。

【0026】ここで、前記パターン基板上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する際に、各材料層の積層形状は形状非保存であるが一周期分の積層形状に関しては形状保存するような非対称形状保存モードを用い

てもよい。

【0027】さらに、前記パターン基板上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層する際に、ある一つの材料を形成保存モードで積層した後に垂直性の高くないエッチングを行うプロセスを追加してもよい。

【0028】

【実施例】以下、図面を用いて、本発明の3次元フルバンドギャップフォトリソニック結晶構造体の作製方法の実施例を説明する。

【0029】まず、実施例1から実施例7において、交互積層法とエッチングによる穿孔法との組み合わせによって、図2に模式的に示した構造体と特性的に同等な構造の構造体を作製する方法について説明する。引き続いて、実施例8および9では、交互積層法とエッチングによる穿孔法との組み合わせによって、図3または4に模式的に示した構造体と特性的に同様な構造の構造体を作製する方法について説明する。

【0030】図2に模式的に示した構造体と特性的に同様な構造の構造体を作製する場合、前段の2次元周期構造体を交互積層によって作製できるかどうかが重要である。図2の構造を特徴づけるものは、前述したように、ダイヤモンド構造の(110)方向に相当する互いに垂直な2方向に、高屈折率媒質がロッド状に伸びているという点と、それらのロッドが隣りの層のロッドと互いに半周期ずつずれながら互いに接しているという点の2点である。このような特徴から、図2に模式的に示した構造体は、ダイヤモンド構造と同じ対称性を持つことになる。図16に示した構造体11では、複雑な加工工程を用いて、前述の特徴を持つ構造を実現しているが、図17に示した2次元周期構造体20と全く同じ形状を交互積層とエッチングで作製することは不可能である。

【0031】そこで、本発明では、図17に示した構造と幾何学的に同等な形状である図27のような2次元周期構造体22に、図28に示すような垂直穴23を形成する方法や、図29に示すような2次元周期構造体24に、図30に示すような垂直穴25に高屈折率材料26を充填する方法によって得られる3次元周期構造体27や28を用いる。これらの構造体27、28も、先程にあげた二つの項目、すなわち、2次元周期構造を交互に積層した構造と垂直穴の形成との2つの項目を満たしており、フルバンドギャップが開く構造体となる。次に、図27および図29に示す構造体22および24が交互積層によって積層可能かを考える。

【0032】パターン基板上の交互積層によって形成される形状では、必ず積層方向には2種類の媒質が交互に並び、同時に積層される部分がグルーピングできなければならない。図27と図29に示した構造では、積層方向(z方向)に見た場合、媒質29(または媒質30)しか存在していない部分がある。したがって、このような構造も交互積層によっては作製が不可能であることが

わかる。しかし、図27と図29では、図に示したA層とB層を一つの対として考えると、交互積層によって形成される構造と似た構成になっている。従って、若干の変更を加えることによって、図27または図29に示す構造体を実現可能である。

【0033】以下に具体的な実施例を用いて、本発明の詳細を説明する。

【0034】(実施例1) まず、図13、14、15に示した工程と同様の工程で、電子ビーム露光によってSi基板上にライン・アンド・スペース(Line&space)のレジストパターンを形成し(a)、このレジストパターンを用いて垂直ドライエッチングによりライン・アンド・スペース・パターンをSi基板上に転写することにより、矩形パターンが基板上に形成される(b)。レジストを剥離した後、この矩形形状がパターン化された基板が得られる(c)。このパターン基板上にバイアススパッタによりSiO₂(媒質30)とa-Si(媒質29)を交互に積層する。ここで、下地の形状が完全に保存される積層モード(自己クロウニングモード)を用いることにより、図31に示すような2次元周期積層構造体31が作製される。次に、作製された2次元周期積層構造体31に、再度リソグラフィにより2次元周期穴レジストパターンを形成する。このレジストパターンを用いて垂直ドライエッチングにより、図32に示すように、垂直穴32を作製する。その結果、図32に示すように、高屈折率媒質29(ここではSi)と低屈折率媒質30(ここではSiO₂)および低屈折率媒質33(ここでは空気)により構成される3次元フォトリソニック結晶構造体34が作製される。

【0035】また、同様の工程で、図33に示すような2次元周期積層構造体35に、図34に示すように、垂直穴36を形成して、媒質29と媒質30の膜厚が非対称な3次元フォトリソニック結晶構造体37も作製可能である。

【0036】図32および図34に示す3次元フォトリソニック結晶構造体34および37は、図2および図3、4の構造と似た構造であり、y方向とz方向に位相が交互にずれたロッドが周期的に形成されており、これがダイヤモンド構造の(110)方向に相当し、フルバンドギャップを持つ。ただし、A層とB層のロッドの間にx方向に間隙が全く無いため、高屈折率媒質(ここではSi)29に関しては、z方向には厳密な意味でつながったロッドは形成されていない。そのためギャップは大きくない。

【0037】(実施例2) 図35および36は、本発明における3次元フォトリソニック結晶構造体の作製方法の第2の実施例を示す模式図である。この実施例では、実施例1の工程の後に、最後に形成された垂直穴32に高屈折率媒質(ここではa-Si)38を充填することにより、高屈折率媒質(ここではa-Si)29と前記高屈

折率媒質38および低屈折率媒質（ここでは SiO_2 ）30により構成される3次元フォトニック結晶構造体39を形成する。この方法では、z方向に関する高屈折率媒質29のロッドが、最終工程のa-Si充填（穴32への高屈折率媒質38の充填）によって、完全に連続したロッドとして形成されるので、ギャップが拡大する。なお、図35は、垂直穴32を穿設する前の2次元周期積層構造体40の前面図であり、図36は、前記2次元周期積層構造体40に垂直穴32を形成し、これらの穴32に高屈折率媒質38を充填して形成した3次元フォトニック結晶構造体39の上面図である。

【0038】（実施例3）図37および38は、本発明における3次元フォトニック結晶構造体の作製方法の実施例を示す模式図である。この実施例では、実施例1の交互積層の工程における高屈折率媒質29の積層プロセスの前に、in-situに行われるエッチング工程をつけ加える。このエッチング工程では、あまり垂直性の強くないエッチング条件を用いて、自己クローニングによって形成されたA層の低屈折率媒質30のロッド形状の側面（垂直面）がエッチングされて、A層のロッド幅が図に示すように減少し、y方向のロッド間に間隙sが生じる。図37では、破線がエッチング前の積層界面を示し、実線がエッチングによって後退した積層界面を示している。その結果、この実施例では、実施例1および実施例2の構造体と違って、各ロッドがx方向に間隙を持つ。従って、得られる3次元フォトニック結晶構造体41は、基本構造的に、図2および図3、4と同等になるため、大きなギャップを持つことになる。なお、図37と図38との関係は、前述した図35と図36との関係と同様であり、図37の符号42は2次元周期積層構造体を示すものである。

【0039】本実施例において付け加えられたエッチング工程は、A層の低屈折率媒質30のロッド側面をエッチングすることが目的であるため、極端に垂直性の高いエッチング条件でないのであれば、各種のエッチング方法を用いることが可能である。積層に用いているバイアスパッタ装置の通常のバイアスパッタ条件では、特定の斜度を持った斜面に対して極大値を持つエッチングが行われるが、これを用いて、本実施例で求められるエッチングを実行できる。その場合、同じ装置でスパッタ条件を変更するだけで可能であるため、完全にin-situに実行可能であり、作製プロセスの手間は殆ど実施例1と変わらない。また、一般的な等方的エッチングを用いても可能であり、例えば、フッ素系ガスをを用いたプラズマエッチングなどを、マルチチャンバー方式で積層チャンバーに接続し、in-situで積層とエッチングを交互に繰り返すことも可能である。

【0040】（実施例4）図39～図41は、本発明における3次元フォトニック結晶構造体の作製方法の第4の実施例を示す模式図である。この実施例では、実施例

1におけるパターン化基板をドライエッチングで作製する工程において、若干等方性を増したエッチング条件を用いることにより、テーバーのついた台形状のパターンを持つ基板を作製するプロセスに変更している。この変更されたプロセスの後、実施例1と同じ形状保持モードの積層を行うことによって、図に示すようなy方向のロッドR1、R2の断面形状が台形であるような3次元フォトニック結晶構造体43、44が作製される。

【0041】この方法では、各ロッドR1、R2間の間隙は実施例1よりも広がっている。ただし、各ロッドR1、R2は薄いロッドで連結されているため、ギャップの大きさは大きくない。

【0042】また、台形を基本形状に用いる場合、図41、42に示すように、高屈折率媒質29と低屈折率媒質30の膜厚を非対称にすることにより、上記の薄いロッドの連結部分をさらに薄くすることが可能である。なお、図39と図40との関係、そして、図41と図42とのそれぞれの関係は、前述の図35と図36との関係と同様であり、図39中の符号45と、図41中の符号46は、それぞれ前記3次元フォトニック結晶構造体43と44を形成するための2次元周期構造体を示すものである。

【0043】（実施例5）図43～図46は、本発明における3次元フォトニック結晶構造体47、48の作製方法の第5の実施例を示す模式図である。この実施例では、実施例4における2次元周期構造体の作製工程に、実施例3の2次元周期構造体の積層に対して行ったエッチング工程を加えたものである。この方法により作製された2次元周期構造体49、50では、各台形ロッドのx方向の間隙は大きく、かつ各ロッドをつなぐ薄いロッドが等方的エッチングにより除去されているので、実施例3で得た構造体よりもさらに大きなギャップ拡大が実現する。

【0044】この場合も、図45、46に示すように、媒質29と媒質30の膜厚を非対称にすることにより、x方向の間隙の拡大が可能である。なお、図43と図44との関係は、前述の図35と図36との関係と同様である。

【0045】（実施例6）本実施例6を図47～図50を用いて説明する。この実施例で得る3次元フォトニック結晶構造体51、52は、それらの2次元周期構造体53、54が、前記実施例4および5に示した構造体に比べて、台形状の斜辺の斜度を小さくしたことを特徴としている。この場合、完全に基板形状を保存する形状保存モードを用いた場合、形成される構造は、図47のようになり、台形ロッドをつなぐ斜めロッド部分の肉厚が厚くなる。そのため、これを等方的エッチングによって除去することは不可能になり、結果として、各ロッドはy断面で見たときにつながった波形形状を呈する。その結果、ギャップは開かなくなる。しかし、媒質29と

媒質30を積層するときに、一層ごとの形状保存モードではなく、図49に示すように、台形の上辺テラスの長さが広がる積層モードと、狭まる積層モードとを交互に用いる(2層1組の形状保存モード)ことにより、斜めロッド部分を薄くすることができる。このようなモードは、一般に形状保存モードの条件から若干ずれた条件で現れる。媒質29と媒質30における各積層モードの条件を調整することにより、各積層モードが補償し、二つを合わせた1周期に関しては完全に形状保存した条件を選ぶことができる。したがって、これまでの実施例と同じ多層化が可能である。

【0046】このような2次元周期積層構造体54に垂直穴55を形成することによって、図50に示すように、前記実施例4とほぼ同じ構造が作製される。

【0047】一般に、形状保存モードは、積層面の斜度が緩やかな方が実現が容易であり、その意味から実施例6は実施例4に比べて作製が容易である。

【0048】(実施例7)図51、52は、本発明における3次元フォトニック結晶構造体56の作製方法の実施例を示す模式図である。この実施例では、前記実施例6の方法に実施例3のエッチング工程を組み合わせることで、実施例5と同様な構造を実現する。この場合、波形の形状の積層斜面自体がバイアススパッタの特性角度に近くなるので、一般的なバイアススパッタ条件で容易に前述した積層面のエッチングを行うことができる。図51は垂直穴を穿設する前の2次元周期積層構造体57を示すもので、図中の破線は前述のエッチングを行う前の積層界面を示し、実線はエッチング後の積層界面を示している。

【0049】以上説明した実施例のうち実施例3、4、5、6、7においては、z方向に垂直穴を形成し、そのままにしておく方法についてのみ説明したが、これらの場合においても、実施例2と同様に穿設した垂直穴に高屈折率媒質を充填する方法を組み合わせることが可能であることは自明である。また、説明では、媒質29を高屈折率媒質、媒質30を低屈折率媒質と設定したが、必ずしもこの場合のみでなく、媒質29と媒質30を入れ替えた場合についても、同様の効果が期待できる。

【0050】また、上記の実施例においては、積層工程と、それに付加するエッチング工程とを分けて実施したが、バイアススパッタにおいてはバイアス等の条件を選ぶことにより、同様のエッチング処理を積層中に行うことも可能である。そのような場合も、上記の実施例に含まれる。

【0051】以上の実施例では、垂直穴の形成前の構造として2次元周期積層構造体を用いていたが、これは3次元周期構造体を用いても、同様に3次元フォトニック結晶構造体を作製することが可能である。以下に、特に指摘する必要があると考えられる構造について、この3次元周期構造体を用いた方法を説明する。

【0052】(実施例8)この実施例では、前述の実施例1において初めに電子ビームリソグラフィによって形成されるレジストパターンを、いわゆるライン・アンド・スペース・パターンではなく、グリッド状の六方格子にし、この六方格子状パターンの基板に対して、前述の実施例に示した形状保存モードの積層と同様な形状保存モード積層を行う。ここで、通常の形状保存モード積層を行うと、図53のような六方格子によるチェッカー・ボード(Checker Board)構造が形成される。このチェッカー・ボード構造は、図に示すように、六角錐台の層58と六方格子グリッド形状層59で構成されている。この構造自体は、図7、8と同様にフルバンドギャップを持たない。

【0053】本実施例では、媒質30(SiO_2)の積層プロセスの後に、実施例5と同様なエッチング工程を付加する。このエッチング工程では、水平面エッチング速度が斜面のエッチング速度に比べて十分に遅いエッチング条件を選ぶことにより、六角錐台の層58がエッチングされて細くなり、かつ六方格子グリッド形状層59は残るようにする。この積層を繰り返すことにより、媒質30のグリッド形状層59が周期的に媒質(Si)29の中に挿入されている構造が形成されて、その間に小さな六角錐台の層58が残る形状になる。作製される3次元フォトニック結晶構造体60の鳥瞰図を、図54に示す。この図54および55では、構造がわかりやすいように媒質30のみを表示した。実際にはこの隙間に媒質29が詰まっている。

【0054】しかる後に、媒質30の六方グリッド格子形状層59の交点部分に垂直エッチングを行い、z軸方向に垂直穴をあけることにより、媒質30と空気による3次元六方グリッド構造の間に媒質30の小さな六角錐台の層58が挿入された3次元フォトニック結晶構造体60が形成される。作製される3次元フォトニック結晶構造体60の上面図を図55に示す。ここで、低屈折率媒質による孤立した小体積の構造は、光の電磁界分布を大きく変えないと考えられるので、このフォトニック結晶構造体60のバンド構造は、基本的には3次元六方グリッド構造と見ることができる。この構造は、同時に媒質29について見ても、六方グリッド格子構造になっており、図4と同じ構造であり、3次元的フルバンドギャップを有する。

【0055】同様の構造は、上記の工程で、媒質29と媒質30を入れ替えて、グリッド格子点で垂直エッチングを行って、穴を形成し、この穴に、図56に示すように、高屈折率媒質61を充填しても作製可能である。

【0056】(実施例9)この実施例の3次元フォトニック結晶構造体62は、前述の図56に示した構造体において、媒質29のエッチング工程で、さらにエッチングを進めて六角錐台の層57を完全に除去してしまうことによって、形成されたものである。この場合、媒質2

9の積層とエッチング工程でz方向の段差が減少してしまつたため、引き続き媒質29の積層過程においては、前述の減少した段差分を補うために、段差が積層過程で成長する非対称形状保存積層モードを用い、1サイクルでの形状保存モードを実現する。このエッチング工程と非対称積層モードとの組み合わせにより、図57に示すように、隙間に六角錐台の層の残らない前述の図4と同じ完全な六角グリッド格子が形成される。図57では、構造がわかりやすいように、媒質29のみを表示したが、実際には隙間に媒質30が詰まっている。

【0057】前述の実施例8、9では、前述の実施例4、5と同様に形成される形状が斜度を持った台形(角錐台)で構成された形状としたが、これは、実施例1、2、および3、6、7と同じように、矩形や波形の場合にも同じ効果が期待できる。

【0058】また、これら実施例8、9では、六方格子を用いて3次元構造体の形成を行ったが、積層開始のパターンに正方格子を用いた場合には、図3と同じ3次元正方グリッド格子構造が形成されることも、同様に自明である。

【0059】以上の実施例1から実施例9までの例では、媒質としてSiおよびSiO₂を用いたが、本発明の作製方法は、これらの材料には限定されないことは明らかである。また、以上の実施例で述べた方法によりSiおよびSiO₂によって構造を作製した後、SiO₂をフッ酸等を用いたの選択性エッチングによって選択的に除去し、Siと空気による3次元フォトニック結晶構造体に転換して、屈折率差を拡大し、結果的にバンドギャップを拡大することも可能である。

【0060】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、3次元フルバンドギャップフォトニック結晶構造体の従来の作製方法が非常に高度な作製技術を必要とし、多層で十分な面積を持った結晶を作ることが非常に困難であった問題点を解決することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来の3次元フォトニック結晶構造体(フルバンドギャップを持つダイヤモンド構造体)の作製方法を示す模式図である。

【図2】従来の他の3次元フォトニック結晶構造体(フルバンドギャップを持つダイヤモンド構造体)の作製方法を示す模式図である。

【図3】従来のさらに他の3次元フォトニック結晶構造体(フルバンドギャップを持つ3次元正方格子構造体)の作製方法を示す模式図である。

【図4】従来のさらに他の3次元フォトニック結晶構造体(フルバンドギャップを持つ3次元六方格子構造体)の作製方法を示す模式図である。

【図5】2次元正方格子パターンがその上面に形成された基板の前面図である。

【図6】図5に示した基板の斜視図である。

【図7】図5、6に示した基板上に交互積層法によって形成された3次元フォトニック結晶構造体の前面図である。

【図8】図7に示した3次元フォトニック結晶構造体の斜視図である。

【図9】通常の積層条件で図7、8に示した積層を行った場合に実際に作製される構造体の前面図である。

【図10】図9に示した構造体の斜視図である。

【図11】2次元六角格子パターンが形成された基板の斜視図である。

【図12】形状保存モード(自己クローニングモード)を用いて図11に示した基板上に交互積層を行って形成される3次元周期積層構造体の斜視図である。

【図13】図11に示した基板を作製するプロセスを示す模式図である。

【図14】図11に示した基板を作製するプロセスを示す模式図である。

【図15】図11に示した基板を作製するプロセスを示す模式図である。

【図16】2次元フォトニック結晶構造体に垂直穴をあけることにより形成されるフルバンドギャップを持つ3次元フォトニック結晶構造体の斜視図である。

【図17】図16に示した3次元フォトニック結晶構造体を得る前の2次元フォトニック結晶構造体の前面図である。

【図18】図16に示した3次元フォトニック結晶構造体の上面図である。

【図19】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、垂直穴をエッチングにより形成した状態を示している。

【図20】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、SiO₂による穴埋めおよび表面平坦化した状態を示している。

【図21】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、さらにSi層を積層した状態を示している。

【図22】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、2層目の垂直穴を形成した状態を示している。

【図23】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、2度目のSiO₂による穴埋めおよび表面平坦化した状態を示している。

【図24】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、3層目のSi層を形成した状態を示している。

【図25】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、3層目の垂直穴を形成した状態を示している。

【図26】図17に示した2次元フォトニック結晶構造体を作製する工程を示す模式図であり、3度目の SiO_2 による穴埋めおよび表面平坦化した状態を示している。

【図27】図17に示した2次元周期積層構造体に変更を加えた2次元周期積層構造体の前面図である。

【図28】図27に示した2次元周期積層構造体に垂直穴をあけることによって形成されたフルバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶構造体の上面図である。

【図29】図17に示した2次元周期積層構造体に変更を加えた2次元周期積層構造体の前面図である。

【図30】図29に示した2次元周期積層構造体に垂直穴をあけ、さらにこの穴を媒質29で充填することによって形成されたフルバンドギャップを有する3次元フォトニック結晶構造体の上面図である。

【図31】本発明における3次元フォトニック結晶構造体の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図32】図31に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図33】本発明における3次元フォトニック結晶構造体の他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図34】図33に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけ、この穴に高屈折率材料を充填して得られた構造体の上面図である。

【図35】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図36】図35に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけ、この穴に高屈折率材料を充填して得られた構造体の上面図である。

【図37】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図38】図37に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図39】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図40】図39に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図であ

る。

【図41】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図42】図41に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図43】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図44】図43に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図45】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図である。

【図46】図45に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図47】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図であって、台形状の積層の斜度が緩い場合に形状保存モードで形成される構造を示している。

【図48】図47に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図49】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図であって、台形状の積層の斜度が緩い場合に形状保存モードで形成される構造を示している。

【図50】図49に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図51】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、作製の第1段階で形成される2次元周期積層構造体の前面図であって、台形状の積層の斜度が緩い場合に形状保存モードで形成される構造を示している。

【図52】図51に示した2次元周期積層構造体にz軸方向から垂直穴をあけて得られた構造体の上面図である。

【図53】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、六方格子上に交互積層した場合に作製される3次元六方周期積層構造体の斜視図である。

【図54】図53に示した周期積層構造体から得られる3次元フォトニック結晶構造体の一部省略して示した斜視図である。

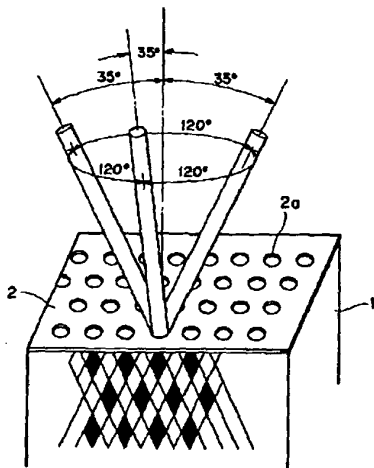
【図55】図54に示した結晶構造体の上面図である。
【図56】図54に示した結晶構造体に垂直穴を形成してなる3次元フォトニック結晶構造体の一部省略して示した斜視図である。

【図57】本発明における3次元フォトニック結晶構造体のさらに他の作製方法を説明するためのものであり、六方格子上に交互積層した場合に作製される3次元六方周期積層構造体にさらに垂直穴を形成して得られた3次元フォトニック結晶構造体の一部省略して示した斜視図である。

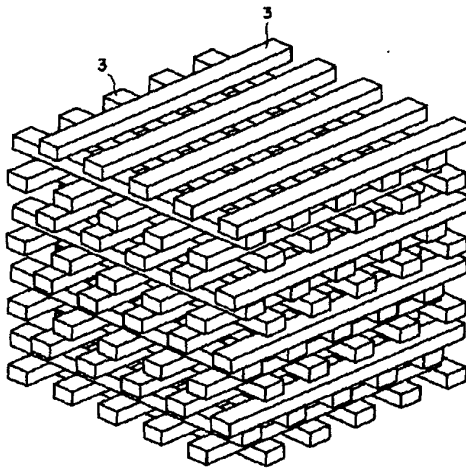
【符号の説明】

- 29、38、61 高屈折率媒質
- 30 低屈折率媒質
- 31、35、40、45、46 2次元周期積層構造体
- 49、50、53、54、57 2次元周期積層構造体
- 32、36、55 垂直穴
- 33 低屈折率媒質
- 34、37、39、41、43、44、47 3次元フォトニック結晶構造体
- 48、51、52、56、60、62 3次元フォトニック結晶構造体
- 58 六角錐台の層
- 59 六方格子グリッド形状層

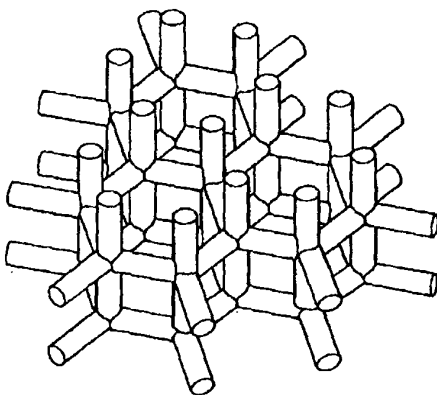
【図1】



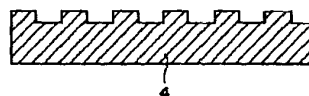
【図2】



【図4】



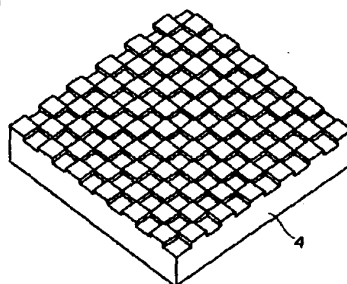
【図5】



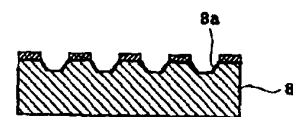
【図13】



【図6】



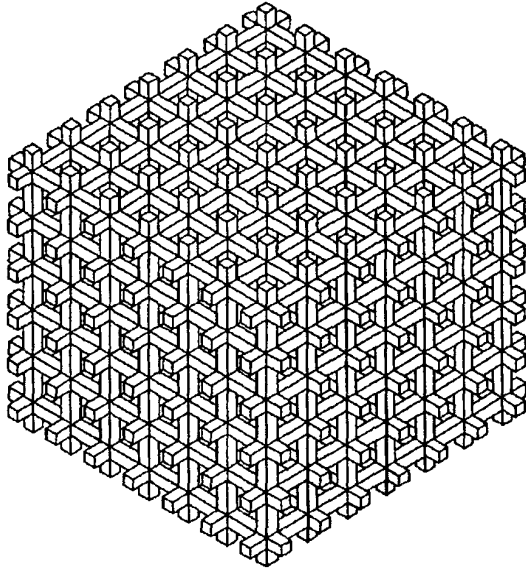
【図14】



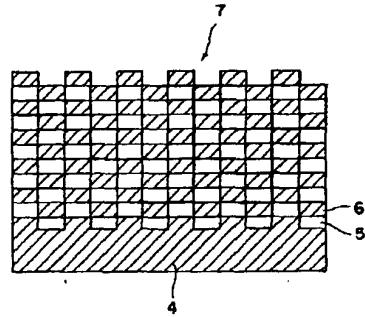
【図15】



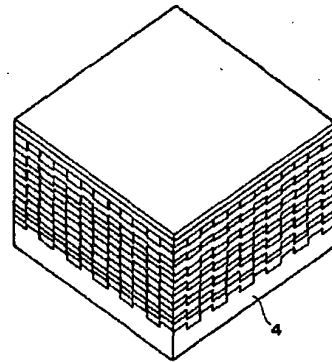
【図3】



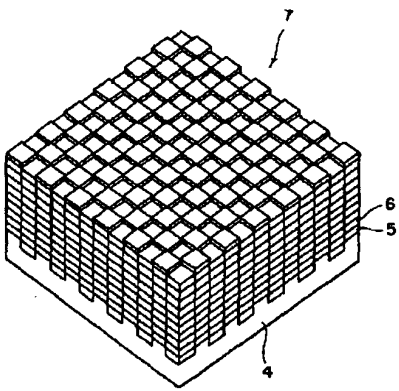
【図7】



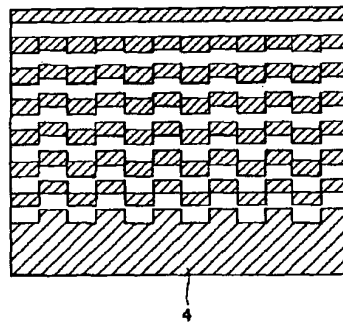
【図10】



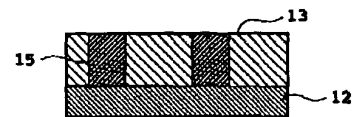
【図8】



【図9】

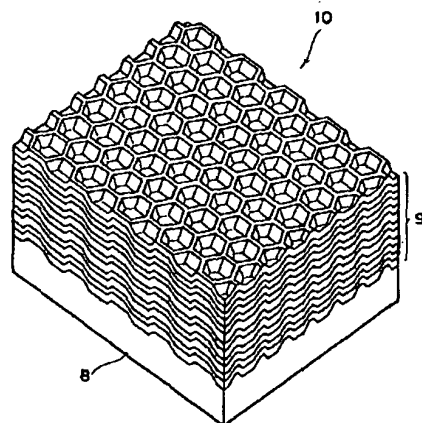
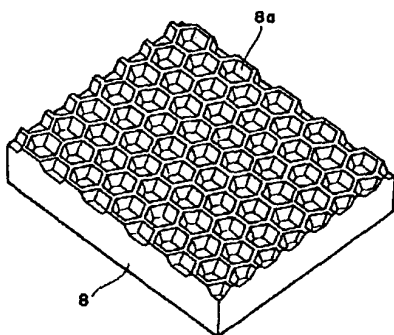


【図20】

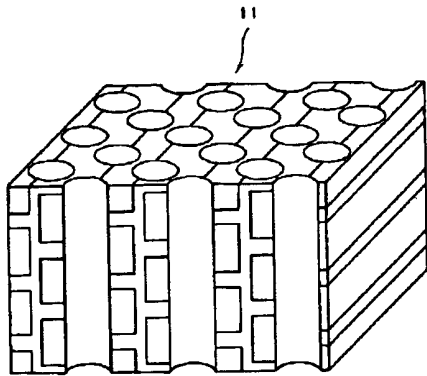


【図12】

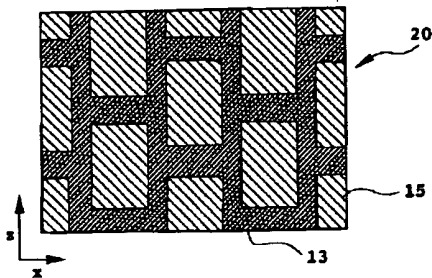
【図11】



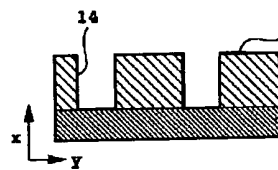
【図16】



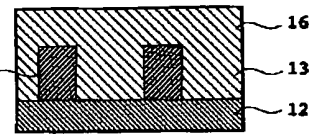
【図17】



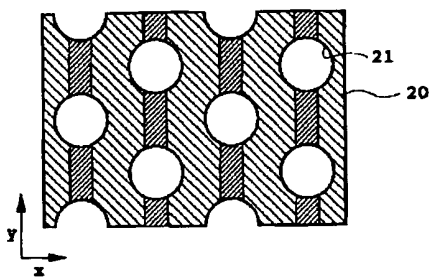
【図19】



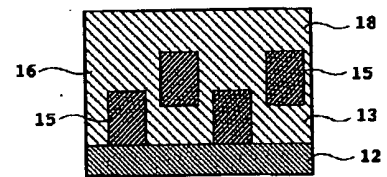
【図21】



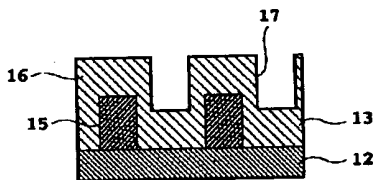
【図18】



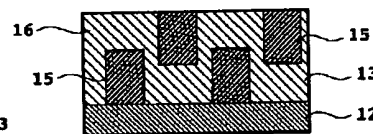
【図24】



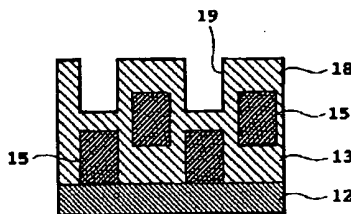
【図22】



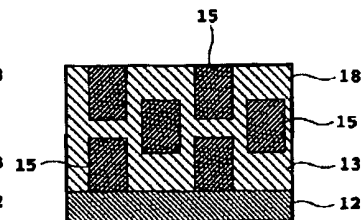
【図23】



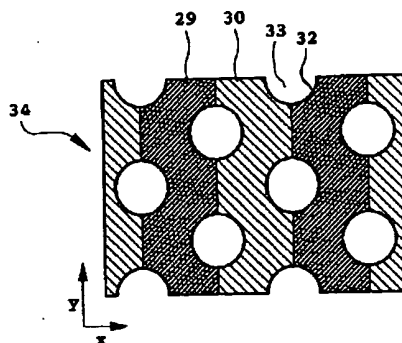
【図25】



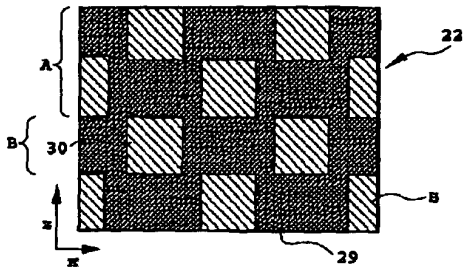
【図26】



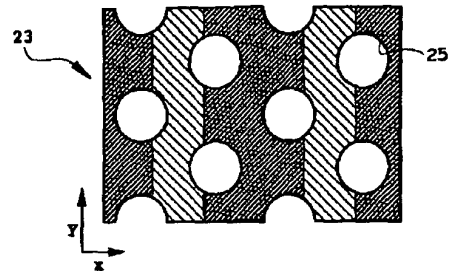
【図32】



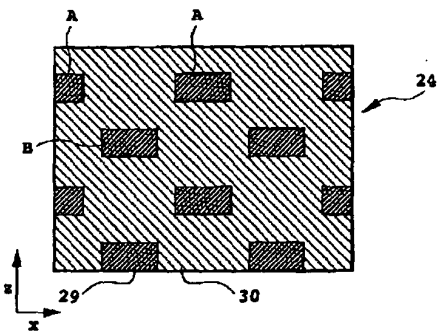
【図27】



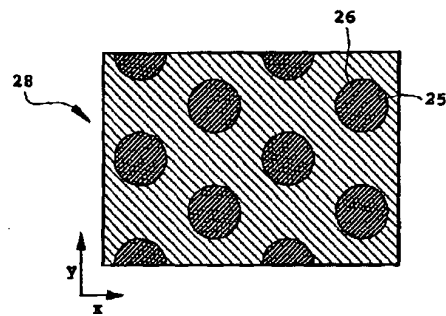
【図28】



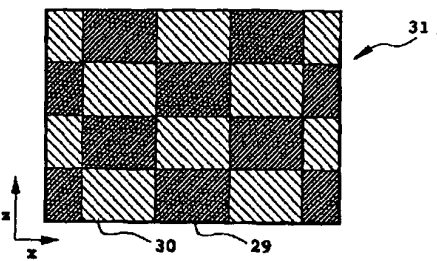
【図29】



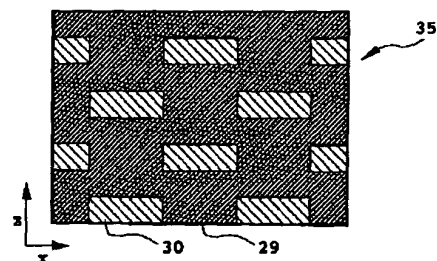
【図30】



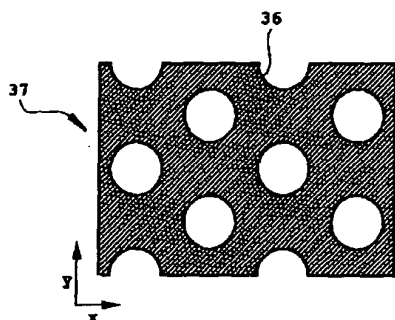
【図31】



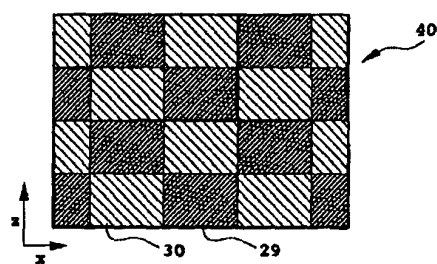
【図33】



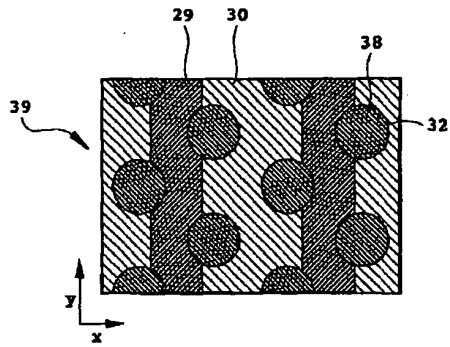
【図34】



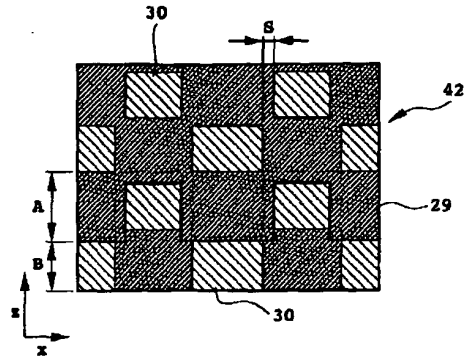
【図35】



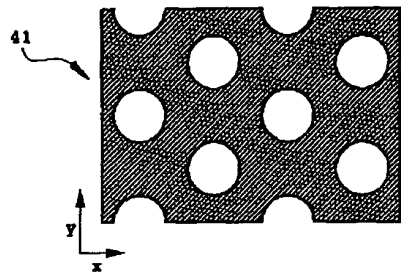
【図36】



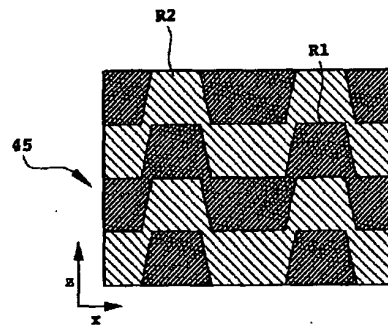
【図37】



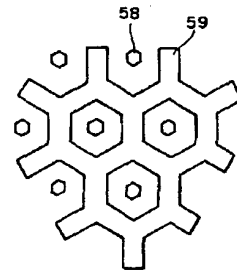
【図38】



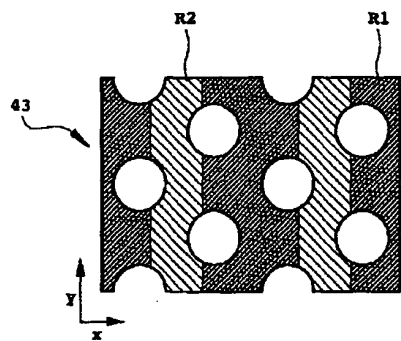
【図39】



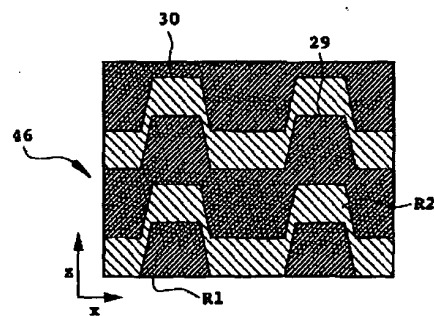
【図55】



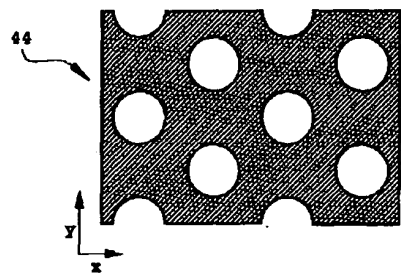
【図40】



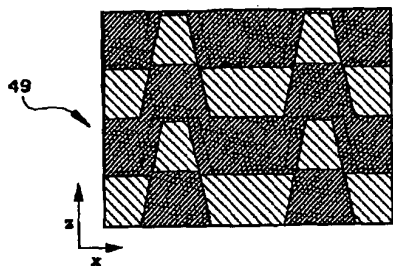
【図41】



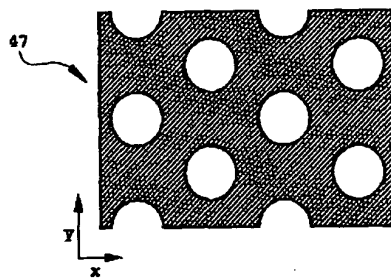
【図42】



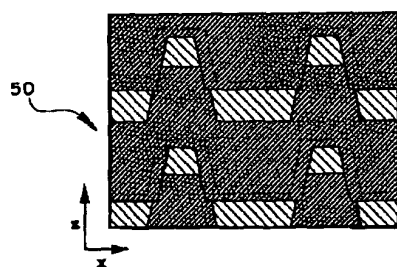
【図43】



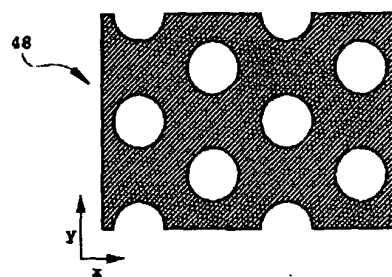
【図44】



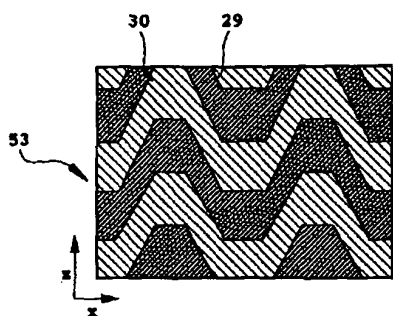
【図45】



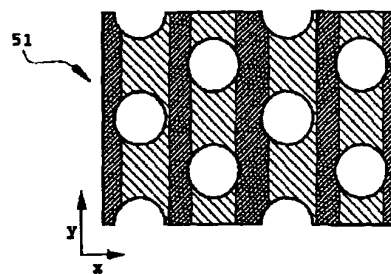
【図46】



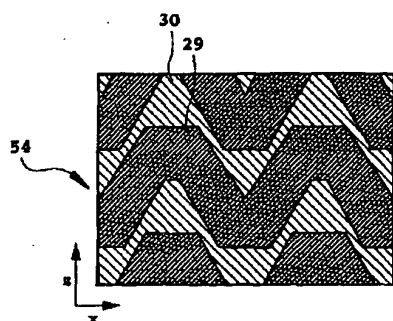
【図47】



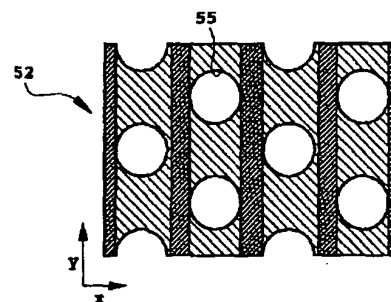
【図48】



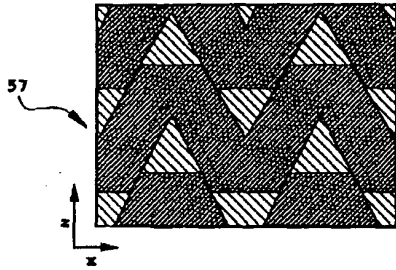
【図49】



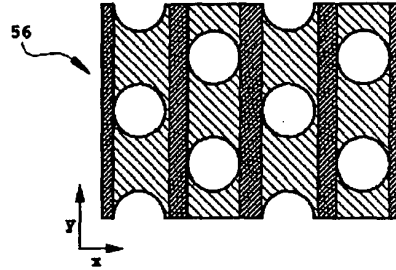
【図50】



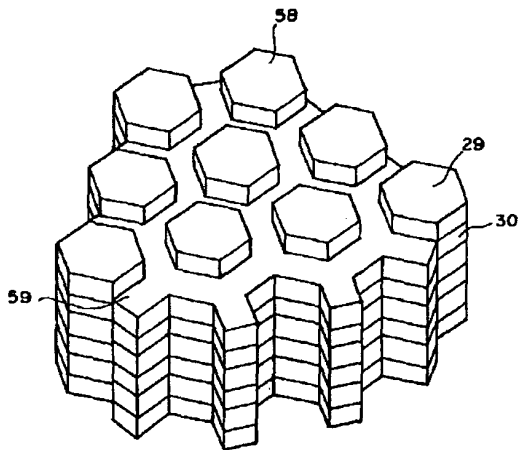
【図51】



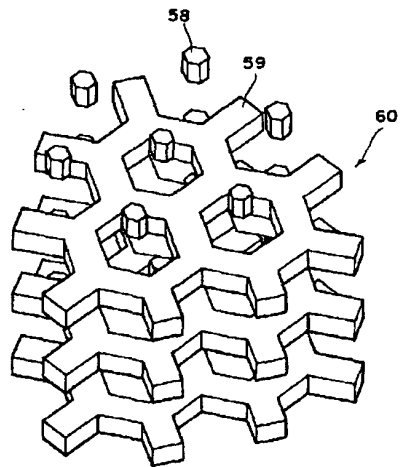
【図52】



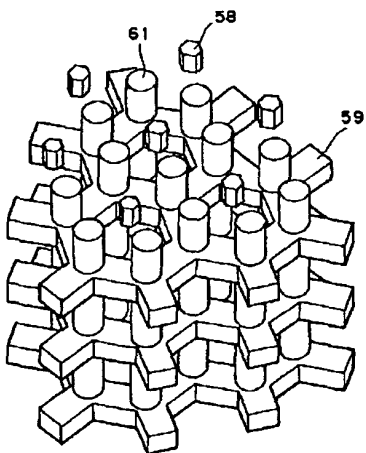
【図53】



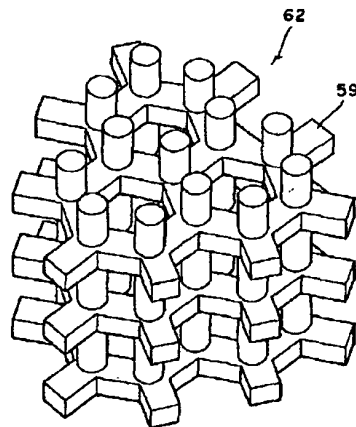
【図54】



【図56】



【図57】



フロントページの続き

(72)発明者 玉村 敏昭
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内
(72)発明者 高橋 千春
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内
(72)発明者 川上 彰二郎
宮城県仙台市若林区土樋236

(72)発明者 大寺 康夫
宮城県仙台市青葉区土樋1丁目6番15号
コーポ金子201号
(72)発明者 川嶋 貴之
宮城県仙台市青葉区川内三十人町45番5号
ル・ヴィラージュ203号
Fターム(参考) 2H047 PA04 PA24 QA02 QA04 TA00